

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

MANIFESTACIONES EXTERNAS DE ALTERACIÓN POR PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS EN EL HORMIGÓN DE PRESAS. CAUSAS E IDENTIFICACIÓN

Esperanza Menéndez³²⁷

RESUMEN: Las características de las presas de hormigón, por el proceso de curado, las cargas y las condiciones ambientales de exposición, hacen que se puedan producir diversas manifestaciones externas asociadas con algún tipo de alteración. Estas manifestaciones suelen ser las siguientes: fisuración, hinchazón, desagregación, disgregación, cambio de color y eflorescencias. La aparición de estos síntomas de alteración se debe a distintas causas, como acciones mecánicas, químicas, físicas o biológicas. Algunas de las alteraciones observadas a nivel macroscópico se asocian de una forma más o menos clara con un determinado fenómeno, pero no siempre es fácil reconocer el origen de la alteración en una inspección visual. Por otra parte, dependiendo del origen de la alteración puede haber una incidencia muy diferente en la durabilidad y la seguridad de la presa. Y su mitigación y reparación será más o menos sencilla dependiendo de la evolución del fenómeno. Debido a esto es esencial que, a partir de las inspecciones visuales, se pueda obtener la mayor información posible, con el fin de encaminar los análisis y estudios necesarios para una correcta diagnosis y reparación en su caso. En el presente trabajo se analizan estos fenómenos desde el nivel macroscópico hasta el microscópico.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón durante su vida de servicio está sometido a la acción del medioambiente circundante. Los principales agentes ambientales a los que se ven sometidos

³²⁷ Dra. Ingeniero Industrial, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)

las estructuras de hormigón son: temperatura, humedad, agentes químicos, agentes biológicos, acciones mecánicas, etc. Con relación a estas posibles degradaciones hay que destacar la acción del agua sobre el hormigón, ya que como vehículo de transporte o por su propia acción está involucrada de forma significativa en numerosos procesos de degradación; debido a esto las presas se pueden considerar como estructuras especialmente sensibles. La acción de los agentes ambientales sobre el hormigón puede producir distintos tipos de alteraciones, de las que cabe destacar los procesos físico-químicos. La alteración del hormigón por procesos físico-químicos estará asociada con las fases principales que existen en el hormigón endurecido, que son sus constituyentes principales (áridos y pasta hidratada), y con sus zonas críticas a nivel microestructural, que están relacionadas principalmente con las interfases (árido-pasta, anhidro-pasta, etc.) y con la red porosa. La acción de distintos agentes se traduce en alteraciones a diferentes niveles en el hormigón, que tienen como consecuencia general una pérdida de sus propiedades, principalmente mecánicas. [1,2,3].

Para garantizar la durabilidad del hormigón de las presas hay que minimizar la acción de las acciones que lleven a alteraciones físico-químicas indicadas anteriormente.

La Guía del Hormigón Durable del ACI clasifica los daños en el hormigón por ataque químico de acuerdo con la siguiente clasificación [4]:

- Ciclos de hielo-deshielo
- Exposición a agresivos químicos
- Abrasión
- Corrosión de las armaduras y de otros materiales embebidos en el hormigón
- Reacción química con los áridos

El hormigón de presa tiene como particularidad la realización in-situ y la utilización de materiales locales o cercanos a la misma, lo que hace que se tengan más limitaciones en cuanto al diseño de las mezclas que para otro tipo de obras. Por tanto, se pueden producir alteraciones relacionadas con las características de los materiales, la compactación del hormigón y la microestructura formada durante el endurecimiento del hormigón.

Las alteraciones físico-químicas en el hormigón se producen a nivel microestructural, produciéndose una manifestación externa del daño. No obstante, no siempre es fácil relacionar la manifestación externa con el origen y el tipo de daño producido a nivel interno en el hormigón. Y, una deficiente diagnosis, puede conllevar actuaciones erróneas. También hay que tener en cuenta que en ocasiones hay simultaneidad de fenómenos de alteración o incluso procesos de alteración colaterales pueden dificultar la identificación de la causa principal de deterioro.

En el presente trabajo se trata de mostrar algunas de las alteraciones externas, observadas en presas, e identificar cuáles son las causas que las originan. Y analizar las alteraciones que se producen en el hormigón, a nivel microestructural, y que generan el deterioro del hormigón.

2. CONDICIONES AMBIENTALES DEL HORMIGÓN EN PRESAS

Los hormigones de las presas están expuestos a la acción del medioambiente que los circunda y a las condiciones meteorológicas del clima existente en la zona

de construcción. Tanto las condiciones climáticas (temperatura, humedad relativa, pluviosidad, insolación, viento, etc.) como otros factores ambientales (iones disueltos en agua, aguas puras, etc.) influyen sobre la estabilidad del hormigón y sobre su potencial evolución durante la vida útil de las presas. Generalmente se definen las clases de exposición del hormigón en función de su mayor o menor exposición a la humedad y temperatura ambientales, a los agresivos concretos (cloruros, sulfatos, etc.), a la concentración de estos agresivos y a la potencial fluctuación de los parámetros meteorológicos.

No obstante, el principal factor de agresividad en el hormigón es el agua, ya que ésta puede ser el propio agente agresivo, acelerando o contribuyendo a los procesos de degradación o como vehículo de transporte de los agresivos. Las clases de exposición pueden definirse, por tanto, en función de la exposición al agua específicamente. Si bien la presencia de otros factores puede producir la simultaneidad de procesos de alteración. Esto sucede, por ejemplo, en estructuras expuestas al agua y a temperaturas muy bajas estacionalmente, en cuyo caso se puede desarrollar simultáneamente lixiviación y alteración por ciclos de hielo-deshielo.

En el caso particular de las presas hay que tener en cuenta los siguientes principales factores medioambientales, relacionados con el desarrollo de alteraciones físico-químicas:

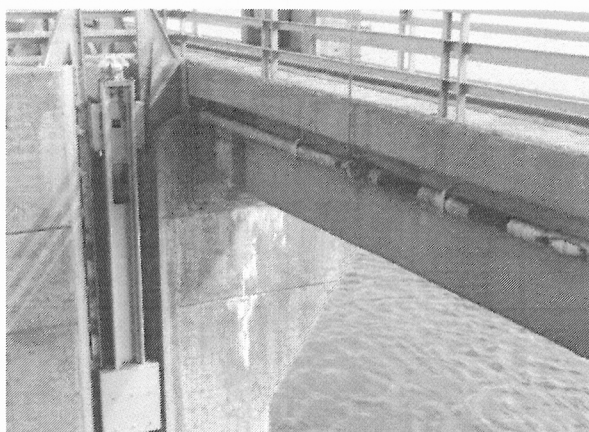
- *Temperatura:* En el hormigón a diferentes alturas de la presa y a lo largo del espesor; con especial incidencia entre las zonas sumergidas o en carrera de marea y las zonas sin contacto con el agua.
- *Insolación:* Las zonas con mayor exposición al sol tendrán una mayor temperatura, pero también estarán más expuestas a procesos de evaporación de agua o ciclos de variación del agua y la humedad en el hormigón y en el aire.
- *Viento:* La presencia de zonas con corrientes de aire incidirán en procesos de evaporación de agua y, por tanto, de movilidad iónica.
- *Agua y humedad relativa:* La superficie aguas arriba (sumergida y no sumergida) y la superficie aguas abajo tienen una diferencia importante en cuanto a evaporación superficial de agua y a movilidad de iones agresivos. Además, la presión hidrostática del agua en el interior del hormigón tiene una importante influencia en el desarrollo de determinadas alteraciones.

3. MANIFESTACIONES EXTERNAS DE ALTERACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

Las manifestaciones externas de las alteraciones físico-químicas están asociadas de forma general con la presencia fisuración, con o sin depósitos en torno a las fisuras, desconchones, pérdidas de material y depósitos superficiales, con diferente coloración.

3.1. ASPECTOS MACROSCÓPICOS DE LOS DAÑOS DE ORIGEN FÍSICO-QUÍMICO

Las manifestaciones externas del daño a nivel macroscópico suelen reflejar una combinación de alteraciones que puede ser una combinación de acciones o tener el origen en una alteración físico-química particular con manifestaciones de otros efectos indirectos. Algunos ejemplos de alteración en presas y el aspecto de los deterioros a nivel macroscópico se puede observar en las imágenes de la Figura 1.



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)

Fig. 20.- Fisuración reticular y depósitos blancos (a), Fisuración, depósitos oscuros y blancos (b), Fisuras principalmente horizontales, filtraciones y pérdida de material (c), Fisuración, exudaciones y depósitos (d), Deslavados, depósitos y colonización biológica (e)

3.2. ANÁLISIS DETALLADO DE LAS SUPERFICIES DE ALTERACIÓN DEL HORMIGÓN

Cuando se observan en detalle la superficie del hormigón se pueden apreciar características asociadas con distintos orígenes del deterioro. Las alteraciones más

habituales están relacionadas con la aparición de fisuras, depósitos o cambios de coloración en torno a las fisuras, depósitos generalmente blancos deslizando por la superficie del hormigón, y pérdida de material, con o sin neo-formación de productos en el hormigón.

Fisuras: Las fisuras reticulares, en forma de mapa, que no progresan en ninguna dirección preferencial son síntomas de reacciones expansivas internas. En el caso de presas, este tipo de fisuras están mayoritariamente asociadas con reacción sílice-álcali y, en menor medida, con el ataque interno por sulfatos o formación de ettringita diferida (Figura 2a, 2b, 2d, 2e, 2f, 2g y 2h). Las fisuras que forman una retícula cuadrada reflejan la posición del mallazo de la armadura y normalmente se producen por un efecto de retracción o asentamiento. Si aparecen óxidos en el contorno de las fisuras reticulares, esto indica una corrosión de las armaduras; pero, si la coloración es más clara u oscura que el hormigón, no se asocian con la corrosión sino con el asentamiento (Figura 2c). Las fisuras cuasi-reticulares están relacionadas de forma mayoritaria con el daño interno por hielo-deshielo (Figura 2k). Por último, las fisuras longitudinales suelen reflejar una tensión del hormigón que puede estar relacionada o no con procesos físico-químicos de deterioro.

Cambio de coloración y depósitos: Hay que diferenciar tres grupos de manifestaciones externas, los cambios de coloración en torno a las fisuras, que pueden tener pequeños depósitos superficiales, los depósitos sobre las fisuras, que muestran relieve y un cambio de coloración en torno a las fisuras, y los depósitos de mayor tamaño, generalmente de color blanco, que descienden desde las fisuras.

Los cambios de coloración en torno a las fisuras corresponden a exudaciones del hormigón, cuya fase líquida tiene un pH muy alcalino, generalmente son geles de reacción sílice-álcali. Si la superficie del hormigón tiene una coloración muy clara, estos depósitos suelen tener una coloración oscura, ya que el gel de reacción sílice-álcali tiene un color ámbar y, dada su elevada viscosidad, fija pequeñas partículas del ambiente, lo que hace que se vaya oscureciendo (Figura 2a y parte inferior de la Figura 2e, 2f y 2g). Los depósitos de color claro (generalmente amarillentos) en torno a las fisuras, se producen cuando hay un exudado de geles de reacción sílice-álcali (Figura 2b y parte superior de la Figura 2e y 2f) o de líquido alcalino de la fase porosa del hormigón (Figura 2c), estas exudaciones eliminan las colonizaciones orgánicas formadas en la superficie del hormigón. Estas colonizaciones orgánicas tienen una coloración muy oscura, casi negra habitualmente, y están originadas por la formación de colonias de hongos sobre las superficies expuestas a una humedad elevada.

Los depósitos con relieve sobre las fisuras tienen su origen en la lixiviación de la portlandita, desde el interior del hormigón, y la formación de precipitados de carbonato cálcico, debido a la acción del CO_2 ambiental. Estos precipitados pueden formarse junto con los geles de reacción sílice-álcali, dando un aspecto de relieve sobre la fisura (Figura 2d y 2f). Los precipitados de carbonato cálcico son de color blanco, si bien en algunas ocasiones muestran una coloración anaranjada, que está relacionada con el arrastre de iones de hierro desde el interior del hormigón, estos iones proceden generalmente de los áridos (Figura 2d).

Los depósitos de mayor tamaño de color blanco que se observan deslizando por las paredes de las presas corresponden a precipitados de carbonato cálcico, formados, según se ha indicado anteriormente, por la lixiviación de la portlandita desde el interior del hormigón. Esta lixiviación se debe al arrastre producido como consecuencia de la presión hidrostática del agua en el interior del hormigón del cuerpo de presa. Se observa que los depósitos se forman a partir de las fisuras u oquedades en la superficie del hormigón y deslizan por las paredes formando precipitados de

color normalmente blanco y de mayor o menor grosor, en función de las capas de carbonato que se vayan depositando sobre las anteriores (Figura 2g y 2l). Estos precipitados de carbonato cálcico muestran coloración anaranjada cuando se produce la alteración de áridos con compuestos ferrosos que se alteran y se arrastran por la acción del agua (parte izquierda de la Figura 2l).

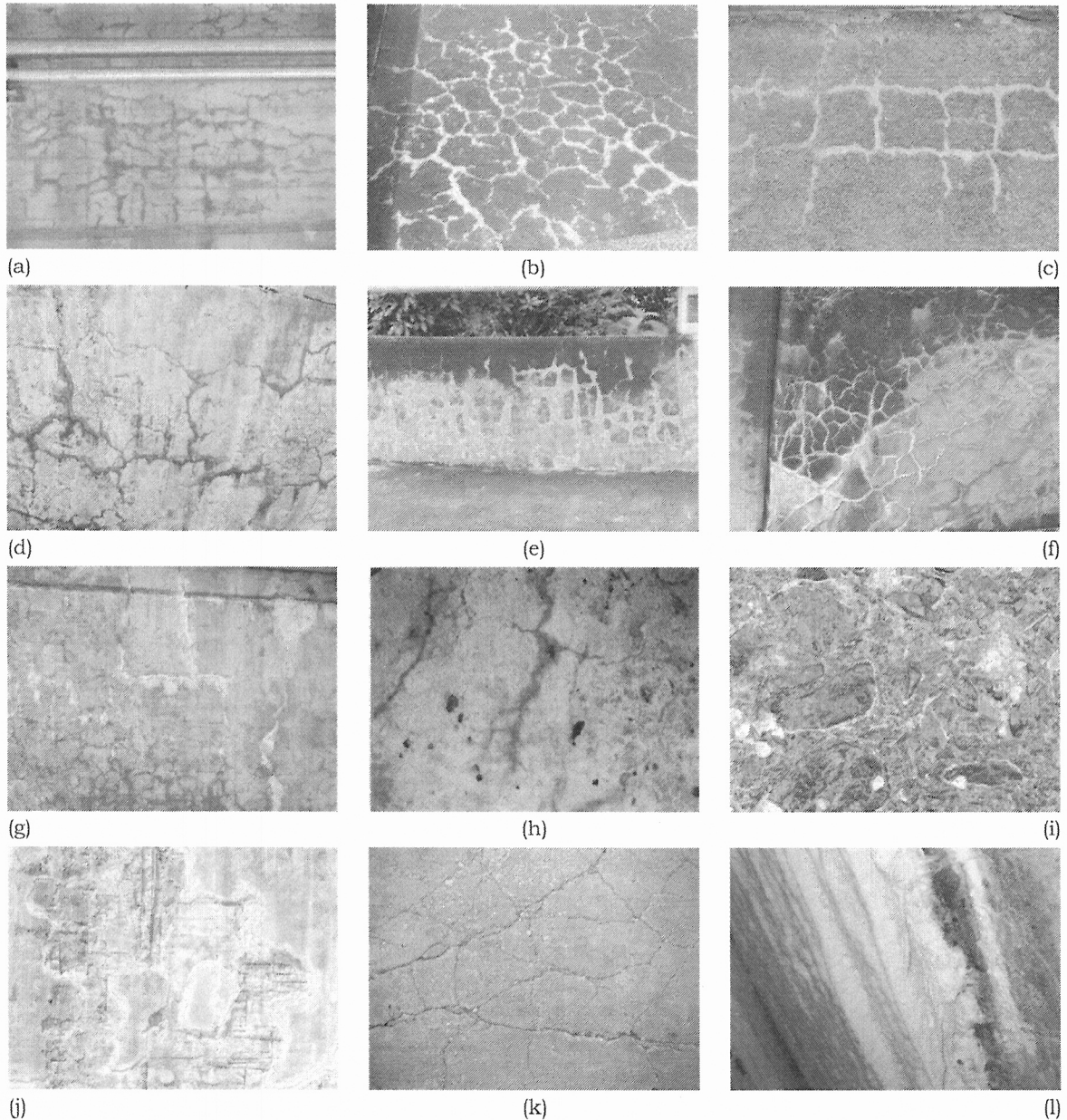


Fig. 2.- Fisuración reticular con coloración oscura alrededor (a), Fisuración reticular con decoloración en torno a las fisuras (b), Fisuras cuadriculada con decoloración alrededor (c), Fisuración reticular con depósitos anaranjados (d), Muro con diferente coloración y fisuración reticular (e), Muro con fisuración reticulada y depósitos de carbonato (f), Depósitos blancos que deslizan por el muro, junto con fisuración reticular (g), Fisuras con coloración anaranjada y pérdida de pasta sobre áridos oscuros (h), Pérdida de material y depósitos blancos en torno a los áridos (i), Pérdida de material y armaduras sin recubrimiento (j), fisuras reticuladas sin depósitos (k) y depósitos blancos y anaranjados (l).

Pérdida de material: Se produce cuando se supera la resistencia a tracción de la pasta cementante, como consecuencia de procesos expansivos cerca de la superficie del hormigón. Las reacciones expansivas tipo reacción sílice-álcali y ataque interno por sulfatos no producen en general este tipo de alteraciones, ya que los procesos expansivos se producen en toda la masa del hormigón y no solo en zonas próximas a la superficie. Sin embargo, otros procesos como la helada producen un aumento de volumen del agua congelada cerca de la superficie, dando lugar a la rotura del hormigón y a la pérdida superficial del material (Figura 2j).

Coloración o decoloración de la superficie del hormigón: El hormigón puede mostrar diferente coloración, como consecuencia de diversas acciones. Mientras que el hormigón tiene una coloración gris, la proliferación de colonias de hongos en su superficie producen una coloración negra (Figura 2b, 2c, 2e y 2f). También se produce una coloración verde cuando se forman líquenes sobre la superficie del hormigón o arraigan pequeñas plantas (Figura 1e). Por su parte, la acción del agua de lluvia produce deslavados o salpicaduras que arrastran la suciedad o inhiben la formación de colonizaciones o depósitos, de forma que se mantiene la colonización gris original del hormigón (Figura 1b y 1e y Figura 2e y 2f).

4. CAUSAS DE ALTERACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL HORMIGÓN

El hormigón endurecido está formado por diferentes fases, que son sensibles a determinadas acciones y pueden ser los puntos críticos donde se nuclean los procesos de alteración del hormigón. Los fenómenos de alteración físico-química están relacionados directamente con alguna de las fases del hormigón.

4.1. COMPONENTES ALTERABLES EN EL HORMIGÓN

Una vez que el hormigón se ha endurecido las fases principales presentes en el mismo son los áridos (gruesos y finos), la pasta cementante hidratada y la red porosa. La distribución y características de estas fases son fundamentales para el desarrollo de potenciales procesos agresivos en el hormigón y para la evaluación de los mismos.

Los áridos en general permanecen inertes durante la hidratación, aunque pueden sufrir alteraciones durante la vida útil de la estructura; éstas son fundamentalmente la reacción con los álcalis (reacción sílice-álcali) y la oxidación de las piritas (ataque interno por sulfatos). Además, las interfases árido-pasta son puntos singulares relacionados con el inicio y desarrollo de alteraciones físico-químicas en el hormigón, ya que en ellos pueden concentrarse iones agresivos y nuclearse la formación de productos reactivos.

Los principales productos de hidratación del cemento lo constituye el silicato cálcico hidratado (gel CSH) y el hidróxido cálcico (portlandita). El gel CSH es el principal componente de la pasta cementante y es amorfo y, a pesar de ser frágil y poroso, contribuye notablemente a la resistencia del hormigón. La portlandita tiene una estructura cristalina y se forma tanto en interfases árido-pasta como entre el gel CSH. El gel CSH y la portlandita se forman durante la hidratación del cemento, durante la evolución de la hidratación se produce una densificación de la pasta cementante y simultáneamente permanecen una serie de canales pertenecientes a la red de poros en la que permanece agua e iones en disolución. La presencia de estos iones y las características de la red porosa de la pasta cementante son determinantes para el comportamiento del hormigón frente a la entrada de agresivos y el desarrollo de alteraciones de origen físico-químico.

Una de las fases fundamentales en lo que se refiere al comportamiento durable del hormigón es la cantidad y distribución de poros, ya que en esta red permanece

agua e iones disueltos y es el canal de transporte de sustancias potencialmente agresivas para el hormigón. Esta red de poros se forma como consecuencia de los procesos de hidratación que en unos casos están conectados y en otros quedan bloqueados en el interior del material, por lo que no pueden transportar iones. El comportamiento del hormigón está muy relacionado por la cantidad, forma y distribución de la red porosa, ya que los líquidos y gases pueden penetrar a través de ella en el hormigón. En los procesos físico-químicos es fundamental la presencia de iones agresivos y la circulación de éstos por la estructura porosa del hormigón, además de su volumen y distribución. Los parámetros fundamentales de la red porosa son: el aire atrapado, la tortuosidad de la red y la composición de la fase líquida del hormigón. Los poros asociados con las alteraciones físico-químicas son los poros capilares y el aire ocluido.

4.2. ALTERACIONES FÍSICO-QUÍMICAS EN EL HORMIGÓN

Las alteraciones físico-químicas del hormigón afectan en distinta medida a las diferentes fases que forman parte del hormigón endurecido. Las fases donde se concentran las alteraciones son: los áridos, la pasta cementante (portlandita, gel CSH y fase porosa) y las interfases (árido-pasta, anhidros-pasta y adiciones-pasta). Los procesos de alteración físico-químicos inducen la formación de fisuras en el interior del hormigón cuando la formación de productos o el cambio en sus propiedades hacen que se supere la resistencia a la tracción del hormigón. Estas fisuras progresan por el material produciendo una manifestación externa de daño en forma de grietas, descamaciones, pérdidas de material, etc.

Los principales procesos de alteración físico-química en el hormigón se produce a nivel de los áridos, de la pasta cementante y de la fase poroso. Estos procesos físico-químicos producen alteraciones a nivel microestructural diferentes en función del origen del daño.

En general, los áridos se consideran componentes inertes del hormigón, si bien en determinadas condiciones sufren alteraciones, bien por interacciones con agentes externos o bien por características intrínsecas. Por su parte, la pasta cementante sigue evolucionando lentamente incluso cuando el hormigón ya está endurecido, además parte de los componentes de la pasta pueden sufrir distintos tipos de reacciones, lo que hace que esta fase sea la más sensible a la acción de los iones que provienen generalmente del exterior.

Reacción árido-álcali: Los áridos de tipo silíceo (amorfo o mal cristalizados) o de tipo calizo reaccionan con los álcalis presentes en el hormigón (procedentes del cemento, del agua o de otros orígenes) formando productos de reacción expansivos que inducen la formación de fisuras. En el caso de la reacción sílice-álcali se genera la formación de geles vítreos expansivos que, en ocasiones, aparecen en la superficie del hormigón como exudaciones.

Ataque interno por sulfatos: Algunos áridos naturales tienen en su composición inclusiones de piritas o pirrotinas (sulfuros de hierro) que en presencia de oxígeno producen la formación de óxidos de hierro y liberan sulfatos, que reaccionan con distintos componentes de la pasta cementante (principalmente con los aluminatos no hidratados del clinker) para formar productos de reacción expansivos, como la ettringita, el monosulfoaluminato o el yeso.

Heladicidad: La congelación del agua en el interior de la red porosa del hormigón produce un incremento de volumen que se traduce en la generación de fisuras y el deterioro del hormigón. Los áridos pueden tener distintas fases o poros en su interior a través de los cuales puede entrar el agua en su interior que al congelarse puede producir una rotura de los áridos. La alteración por el hielo se produce en la zona superficial del hormigón.

Lixiviación – Descalcificación: En presencia de aguas puras o de aguas ácidas se puede producir un ataque ácido al hormigón, que descompone la portlandita produciendo una extracción del calcio, con la consiguiente descalcificación y pérdida de cohesión de la pasta cementante. También, el gel CSH puede sufrir descalcificación cuando está en contacto con agua, produciéndose una migración de calcio a la superficie y una pérdida de cohesión de la pasta por descalcificación. El calcio migrado a la superficie del hormigón por el agua filtrante se combina con el CO_2 ambiental produciendo la formación de depósitos de carbonato cálcico.

A nivel microestructural las alteraciones producidas son características de cada tipo de deterioro y, por tanto, sirven para identificar de forma adecuada el origen de la alteración.

La reacción árido-álcali produce la formación de geles y productos microcristalinos en interfases árido-pasta, en la pasta cementante, en el interior de fisuras (Figura 3a) y en el interior de los áridos (Figura 3b).

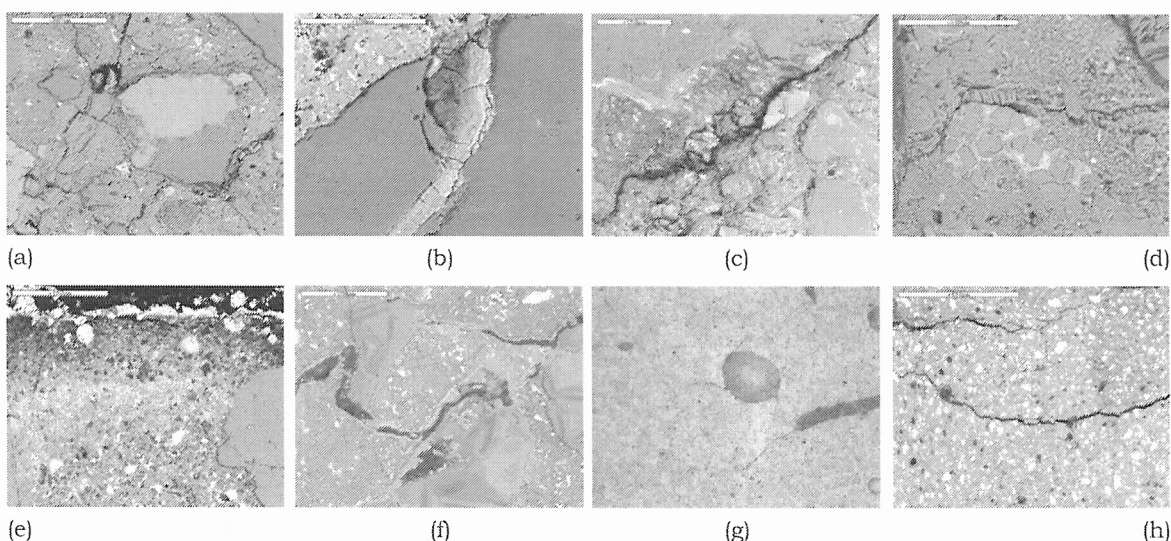


Fig. 3.- Geles de RAA en interfases árido-pasta, poros y fisuras (a), Geles de RAA en el interior de áridos fisurados (b), Cristalizaciones de ettringita en poros e interfases, generando la formación de fisuras (c), Fisuras con cristalizaciones de ettringita, debido a ataque interno por sulfatos (d), Formación de acumulaciones de calcio en la pasta y depósitos de carbonato cálcico en la superficie, debido a lixiviación (e), Depósitos de calcio en huecos y poros (f), Fisuras sin depósitos debido a ciclos de hielo-deshielo (g) y Fisuras paralelas sin depósitos debido a la expansión por hielo (h).

En el ataque interno por sulfatos se forman cristalizaciones de ettringita que se forman en interfases árido-pasta, en el interior de poros, en la pasta y generan la formación de fisuras (Figura 3c), además puede formarse en el interior de los áridos y en el interior de fisuras, cristalizando en forma de empalizada perpendicularmente a la dirección de progresión de fisura (Figura 3d).

La lixiviación del calcio, por la acción de agua filtrante a presión, produce acumulaciones de calcio a escasas micras de la superficie y la formación de depósitos de carbonato cálcico en la superficie del hormigón (Figura 3e); el calcio lixiviado de la portlandita y del gel CSH puede acumularse, también cerca de la superficie, en el interior de poros y huecos o fisuras (Figura 3f).

El daño por hielo-deshielo produce el incremento de volumen del agua en el interior de la fase porosa y se genera la formación de micro-fisuras en las que no se

forma ningún tipo de productos de reacción; estas fisuras tienden a formarse de forma paralela a la superficie de exposición al frío (Figura 3g y 3h).

5. CONCLUSIONES

El hormigón de las presas está expuesto a unas condiciones medioambientales especialmente sensibles debido a la exposición a la temperatura exterior, la insolación y el viento. Además, la presencia de agua hace que el hormigón presas sea especialmente sensible a alteraciones físico-químicas. Las alteraciones físico-químicas que más incidencia tiene en el hormigón de presas es la descalcificación, debido a la lixiviación de calcio, la alteración debido a la acción del hielo y la expansión, debido a la reacción sílice-álcali y ataque interno por sulfatos.

La manifestación externa de este tipo de alteraciones en ocasiones no son suficientemente claras para ser identificadas en una inspección visual, incluso aunque ésta sea detallada. No obstante, el análisis microestructural del hormigón permite identificar cada tipo de daño específico. Hay que considerar que en muchas ocasiones se produce una simultaneidad de fenómenos de alteración, pudiendo producirse una sinergia o influencia de una determinada alteración sobre otra; lo que hay que tener en cuenta de cara al mantenimiento y a la potencial reparación de las estructuras.

4. REFERENCIAS

- [1] Menéndez, E. *Análisis del hormigón en estructuras afectadas por reacción árido-álcali, ataque por sulfatos y ciclos de hielo-deshielo*. Ed. IECA, Madrid, (2010)
- [2] Menéndez, E. *Interacción del hormigón con el medioambiente. Acciones físico-químicas. Diagnóstico, evaluación y actuaciones en estructuras de hormigón afectadas por alteraciones físico-químicas*. Ed. Instituto Eduardo Torroja (CSIC), Madrid (2013)
- [3] Menéndez, E. *Resistencia del hormigón al ataque ácido. Origen y tipo de ataques ácidos en los elementos de hormigón*, PHI – Planta de Hormigón Internacional, Vol. 2 (2014)
- [4] ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete*, ACI 201.2R-08, Ed. American Concrete Institute, (2008)